

一个大气层核试验放射性碎片 长距离输送的三维欧拉模型

郑毅 王自发 黄美元

(中国科学院大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘要 提出了一个三维大气层核试验放射性碎片长距离输送和沉降的 Euler 模型, 用一个烟团模式对源项进行了初始化, 以适应 $1^\circ \times 1^\circ$ 的网格; 模型考虑了干、湿沉降, 垂直扩散以及放射性衰变; 利用中国某次大气层核试验空中烟云及地面放射性沉降数据对模式进行了检验, 初步得出了核烟云在对流层及平流层的输送及扩散规律。

关键词: 输送; 扩散; Euler 模型; 放射性

1 引言

在大气层核试验中, 裂变的放射性物质及弹体在数千万摄氏度的高温下完全汽化, 并形成巨大的火球, 由于它高于环境温度, 具有很大的浮力, 可以非常迅速地上升^[1]。在辐射出热量并和空气混合后, 汽化物质凝结成放射性颗粒并形成烟云, 在浮力的作用下进入对流层和平流层并随风运动, 较大的粒子降落在试验场附近, 进入平流层的较小粒子可以在大气中随风飘浮数年, 放射性粒子可以散布在巨大的区域上并造成放射性沉降。

24 小时内降落到地面的试验场区附近的核爆炸放射性沉降在 60 年代曾经获得了广泛关注^[2], 因为它可以造成人员伤亡, 是核武器效应中影响面积最大的; 超过 24 小时的沉降被称作延迟沉降或全球沉降, 由于其沉降量只比天然放射性本底高不多, 对人体没有急性伤害, 没有获得足够的重视, 尚没有人对其进行深入的研究。

自 70 年代以来, 酸雨及核电站事故的出现使人们逐渐认识到污染物和痕量物质长距离输送的重要性, 研究的水平尺度范围从几十公里扩展到几千公里, 垂直尺度扩展到了整个大气边界层, 几十个区域尺度空气污染模式被开发出来^[3,4]。关于长距离输送和扩散的模式研究在 Knox 等^[5]、Pack 等^[6]、Eliassen^[7]、Fisher^[8]、Pielke 等^[9]的文章中得到了全面回顾。为了验证这些模式, 进行了数次长距离的扩散实验^[10], 如 CAPTEX (Cross-Appalachian Tracer Experiment) 和 ANATEX (Across North America Tracer Experiment) 试验, 但试验的垂直范围只限于大气边界层^[11]。由于缺少实验数据, 人们对对流层及平流层的痕量物质输送和扩散规律研究远不如大气边界层清楚。如果要通过实验来解决这个问题, 将耗资巨大, 也非一时可成。

本文的目的是, 提出一个长距离对流层及平流层大气输送和扩散的三维 Euler 模

式, 尝试利用中国一次大气层核试验放射性碎片云作为示踪物, 利用空中及地面放射性测量数据对模式进行验证, 初步得出一些核烟云在对流层及平流层扩散的经验性规律。

2 源项及其初始化

根据 Geer^[12]报道, 中国 1974 年 6 月 17 日进行了一次空爆大气层核试验, 其当量约为 200~1000 kt TNT 当量, 我们取其中值 500 kt, 并认为裂变份额为 100%。爆后 1 分钟裂变武器的总 β 放射性活度为^[13]

$$C_{\beta 0} = 3.7 \times 10^{21} Q \quad (\text{Bq}), \quad (1)$$

其中, Q 为当量 (单位: kt)。因此, 这次核爆的 1 分钟时的放射性总量为 1.85×10^{24} Bq。

由于核爆炸瞬时产生的放射性烟云的初始尺度非常小, 约数千米, 而我们模式中的网格为 $1^\circ \times 1^\circ$, 因此必须当烟云向下风方向扩散一段时间后, 烟云的尺度足够大时, 再采用 Euler 模式计算。我们假设初始核爆烟云是一瞬时烟团, 根据 Gifford^[14]的对流层相对扩散公式:

$$\sigma_y^2 = \sigma_0^2 + 2KT_L \left[\frac{T}{T_L} - (1 - e^{-T/T_L}) - \frac{c}{2}(1 - e^{-T/T_L})^2 \right], \quad (2)$$

其中, K 为涡旋扩散系数, $K \sim 5 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{s}$, T_L 为拉格朗日时间尺度, $T_L \sim 10\,000 \text{ s}$, $c \sim 1$ 。假设核爆碎片云水平方向是高斯分布, 标准差是 σ_y 。根据中国核试验场位置与风场情况, 可估计出当烟团运行 3 小时后, 到 (95°E , 41°N) 时, $\sigma_y \sim 0.4^\circ$ 。表 1 为假设的云的垂直分布, 是根据辐射探空仪实测数据经过适当修正得到 (见图 3)。在这里, 忽略放射性粒子的重力惯性, 假设其像大气质点一样随风场运动, 向下风方向输送扩散。

表 1 放射性云的垂直分布

高度范围/km	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~12	12~14	14~16	16~18	18~20
放射性百分比	1%	1%	1%	1%	1%	10%	20%	28%	20%	17%

根据 Nathans 等^[15]的空中飞机取样分析, 放射性粒子的尺度分布是对数正态分布, 中值半径是 $R_s = 0.1 \mu\text{m}$, 几何标准差是 $S = 2$ 。Bridgman 等^[16]认为, 放射性活度—粒子尺度分布是粒子的面分布和体分布的权重平均, 即:

$$A(r)dr = C_1 A_s(r)dr + C_2 A_v(r)dr, \quad (3)$$

其中, $A(r)dr$ 表示半径为 $r \sim r + dr$ 的粒子占总放射性的百分比, $A_s(r)$ 为面分布, $A_v(r)$ 为体分布, 中值半径分别为 $\ln R_s + 2\ln^2 S$ 和 $\ln R_s + 3\ln^2 S$, 几何标准差为 S , C_1 、 C_2 为常数, $C_1 = 0.32$, $C_2 = 0.68$ 。由于粒子谱是连续的, 因此有必要把粒子按大小分成不同的区间, 每一粒子区间的放射性分数通过积分 (3) 式得到:

$$F_i = \int_{R_i}^{R_{i+1}} A(r)dr. \quad (4)$$

表 2 是不同的粒子区间所占放射性总量百分比和重力沉降速度。从表 2 可以看到: 半径 $< 2 \mu\text{m}$ 的粒子占了放射性总量的 95% 以上, 但其沉降速度很小。重力沉降速度 V_{gi} 从 Beard^[17] 的方程得出。假设粒子密度为 $2\,600 \text{ kg/m}^3$ 。

表 2 不同的粒子区间所占放射性总量百分比和重力沉降速度

粒子半径 / μm	0.1~0.25	0.25~0.5	0.5~1	1~2	2~4	4~15	15~30	30~60
放射性百分比 $F_i / \%$	26.5	36.5	25	7.2	0.86	4.04×10^{-2}	1.15×10^{-3}	5.96×10^{-6}
$V_{\text{gi}} / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1.88×10^{-5}	6.42×10^{-5}	2.18×10^{-4}	7.94×10^{-4}	3.02×10^{-3}	1.08×10^{-2}	4.06×10^{-2}	1.57×10^{-1}

3 Euler 输送和扩散模式

3.1 模式的动力框架^[18]

Euler 污染物输送方程的一般形式为

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right] - R_d - W_{\text{ash}} - D_c + S. \end{aligned} \quad (5)$$

采用地形追随球坐标系, 三维 Euler 污染物输送方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\Delta H \cdot C_i) + \frac{\partial}{R \cos \theta \partial \varphi} (u \Delta H C_i) + \frac{\partial}{R \cos \theta \partial \theta} (v \cos \theta \Delta H C_i) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (W C_i) \\ = \frac{K_\varphi \partial}{R^2 \cos^2 \theta \partial \varphi} \left[\Delta H \frac{\partial C_i}{\partial \varphi} \right] + \frac{K_\theta \partial}{R^2 \cos \theta \partial \theta} \left[\Delta H \cos \theta \frac{\partial C_i}{\partial \theta} \right] + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_\sigma \partial C_i}{\Delta H \partial \sigma} \right] \\ - R_d \Delta H - W_{\text{ash}} \Delta H - D_c \Delta H + S \Delta H, \end{aligned} \quad (6)$$

其中, C_i 为第 i 种尺度粒子单位体积 β 放射性活度, 初始值 $C_{i0} = F_i C_{\beta 0}$, $i=1, 2, \dots, 8$ 。总单位体积放射性活度为 $C_\beta = \sum_{i=1}^8 C_i$ (单位: Bq/m^3), t 为时间 (单位: s), θ, φ 分别为纬度、经度, R 为地球半径, $K_\theta, K_\varphi, K_\sigma$ 为经向、纬向、垂直湍流扩散系数, u, v 为水平风速, R_d 为干沉降项, W_{ash} 为湿清除项, D_c 为放射性衰变项, S 为源项。地形坐标 σ 满足:

$$\sigma(\theta, \varphi) = \frac{z - h(\theta, \varphi)}{H - h(\theta, \varphi)} = \frac{z - h}{\Delta H}, \quad (7)$$

其中, H 为模式顶高度, 取为 25 km ; $h(\theta, \varphi)$ 为地形高度; $\Delta H = H - h(\theta, \varphi)$ 。等效垂直运动速度 W 为

$$W = w - \frac{u}{R \cos \theta} \left[\frac{\partial h}{\partial \varphi} + \sigma \frac{\partial \Delta H}{\partial \varphi} \right] - \frac{v}{R} \left[\frac{\partial h}{\partial \theta} + \sigma \frac{\partial \Delta H}{\partial \theta} \right]. \quad (8)$$

在目前的模式中使用水平网格为 $1^\circ \times 1^\circ$, 计算范围为 ($80 \sim 130^\circ \text{E}$, $20 \sim 50^\circ \text{N}$), 垂直分为 20 层, 即 0、0.1、0.5、1、1.5、2、3、4、5、6、7、8、9、10、12、14、16、18、20、22、25 km, 共有网格 30 000 个; 时间分辨率为 20 min。差分格式为上

游格式, 当 $u\Delta t / \Delta x < 1$ 时, 格式是稳定的。

3.2 干沉降过程

在核爆炸放射性微粒的输送和扩散过程中, 沉降是主要机制之一, 在没有降水的条件下, 由于重力、湍流运动等的作用, 放射性颗粒随时会在地面滞留, 形成大气向地面的质量输送过程。在本模式中, 设

$$R_d \Delta H = (V_d + V_{gi})C_i, \quad \text{模式底层,} \tag{9}$$

$$R_d \Delta H = V_{gi}C_i, \quad \text{其他层,} \tag{10}$$

其中, $R_d \Delta H$ 为沉积通量, V_d 为湍流沉积速度, V_{gi} 为第 i 种尺度粒子重力沉积速度(具体数值见表 2)。假设 $V_d = 0.001 \text{ m/s}$, C_i 为第 i 种尺度粒子放射性活度。总的地面沉积通量为

$$\sum_{i=1}^n (V_d + V_{gi})C_i, \quad (\text{Bq} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}).$$

3.3 湿清除过程

雨滴的冲刷对放射性烟云浓度影响很大, 把雨水的冲刷过程定义为

$$W_{\text{ash}} = W_a \cdot C, \tag{11}$$

其中, W_{ash} 为冲刷量, C 为放射性浓度, 冲刷系数 W_a 与雨强有关^[19]:

$$W_a = 0.33 R^{0.83}, \tag{12}$$

其中, R 为雨强。

3.4 扩散过程

扩散系数反映了大气湍流过程对物质在水平和垂直方向的输送能力, 由于气象资料的限制, 模式未对边界层湍流进行参数化处理, 故只能对扩散系数进行简化处理。水平扩散系数取为随高度变化的值^[20]:

$$K_\theta = K_\phi = 1.42 \times 10^4 e^{z/H} \quad (\text{m}^2/\text{s}),$$

其中, z 是高度, $H = 7 \text{ km}$ 。该式根据我国 20 次大气层核试验烟云宽度数据及 Barr 和 Gifford^[21]的数据拟合出。根据文献[22], 垂直扩散系数取为

$$K_\sigma = K_{z0} + l^2 s^{1/2} \frac{Ri_c - Ri_b}{Ri_c}, \quad Ri_b < Ri_c, \tag{13}$$

$$K_\sigma = K_{z0} \quad Ri_b \geq Ri_c, \tag{14}$$

其中, $s = \left(\frac{\Delta u}{\Delta z} \right)^2 + \left(\frac{\Delta v}{\Delta z} \right)^2 + 10^{-9}$, Ri_b 为总体 Richardson 数, 临界 Richardson 数 $Ri_c = 0.257 \Delta z^{-0.175}$, 混合长 $l = 40 \text{ m}$, $K_{z0} = 1.0 \text{ m}^2/\text{s}$ 。由于在模拟中只有对流层中的放射性物质才会对地面沉降产生影响, 因此, 在模式中未对平流层的垂直扩散特征进行细致的参数化。

3.5 放射性衰变

由于放射性衰变, 任意时刻 t 的总 β 放射性活度为

$$C_\beta = C_{\beta 0} (t/t_0)^{-n}, \tag{15}$$

$$D_c = \frac{\partial C_\beta}{\partial t} = - \frac{n}{t_0} C_{\beta 0} \left(\frac{t}{t_0} \right)^{-n-1}, \tag{16}$$

其中， t_0 为 1 min；对于长时间平均， $n=1.2$ 。

4 结果与讨论

采用以上模式分析第二节中所述源项，气象数据来自 NCAR 重新分析数据^[23,24]，数据内容包括 17 层等压面风、位势高度、温度和湿度，水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ，数据时间间隔为 24 h。需要把以上数据内插到 $1^\circ \times 1^\circ$ 等 σ 面上。

该次试验在西北罗布泊地区核试验场进行，升起的烟云在西北西气流的作用下向下风方向输送和扩散。在 14 km 高空，中国空军对烟云的宽度和走向进行了测量（图 1）。在这一高度，由于风速较大，24 小时后核烟云即到达长江出海口，而低层烟云的沉降和扩散则持续了数天。

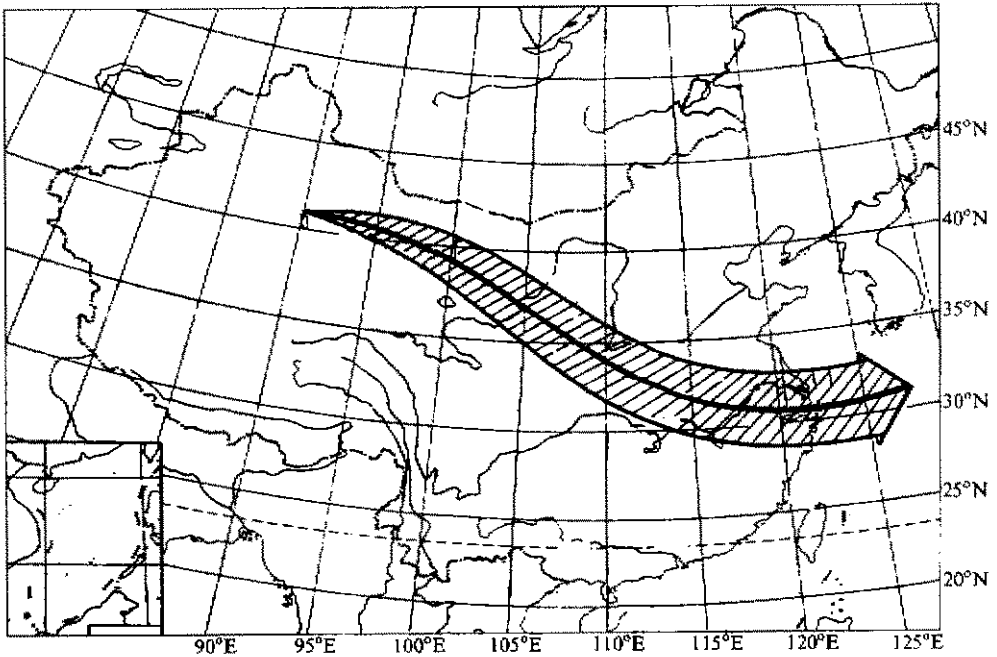


图 1 该次试验 14 km 飞机实测放射性烟云空中走向示意图

图 2 为 1974 年 6 月 17 日 150 hPa 东亚流线图，和图 1 对比可以看出，空中烟云完全按流线走，在长江口气流分为两叉，一股向西南，一股向东北。我们将在后面看到这两股气流对放射性微粒输送扩散的影响。

图 3、图 4 是放射性浓度的垂直分布模拟值及实测值比较。在模拟中，随时间的演变，由于小粒子的重力沉降速度小，其浓度高值区下降较慢，大粒子重力沉降速度大，

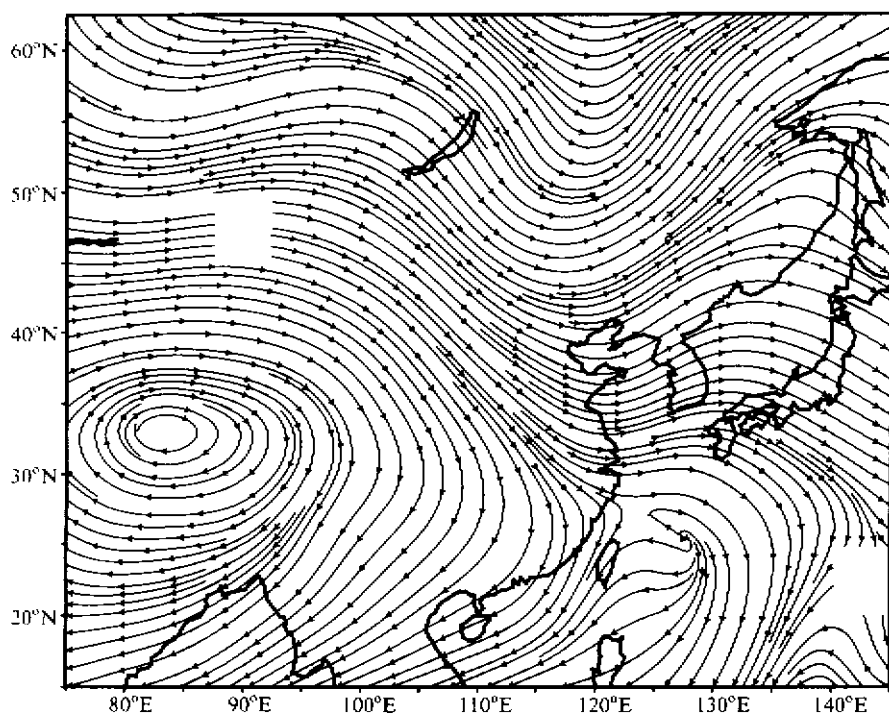


图2 1974年6月17日08时东亚150 hPa 流线图

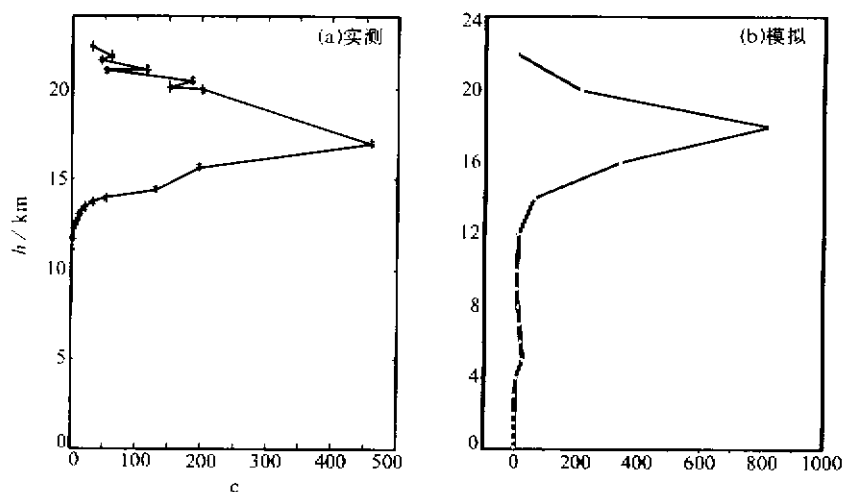


图3 1974年6月17日18时(95°E, 40°N)辐射探空仪实测数据(a)和模拟值(b)

其浓度高值区下降较快。因此,可以说在大粒子段重力沉降速度在垂直输送中起决定性作用,在小粒子段垂直扩散起决定性作用。由于小粒子段放射性占总放射性的百分比大,因此垂直扩散的作用在整个沉降过程中是重要的。

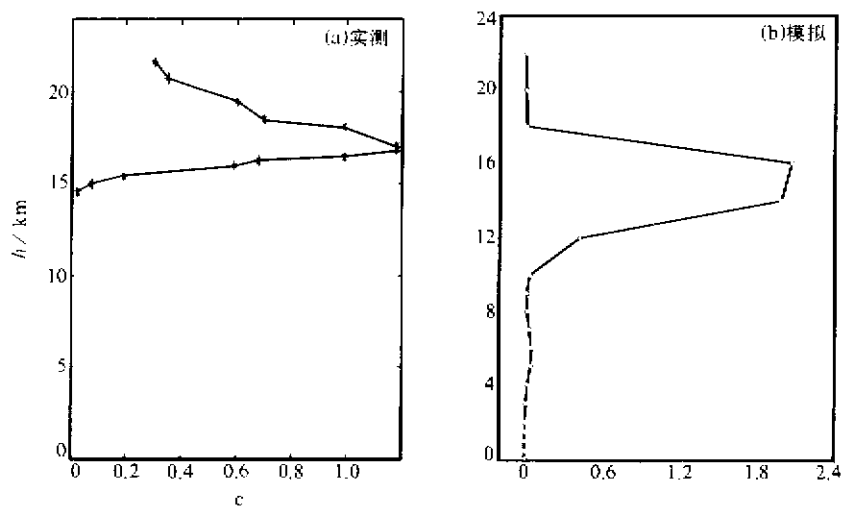


图4 1974年6月18日8时(104°E, 35°N)辐射探空仪实测数据(a)和模拟值(b)

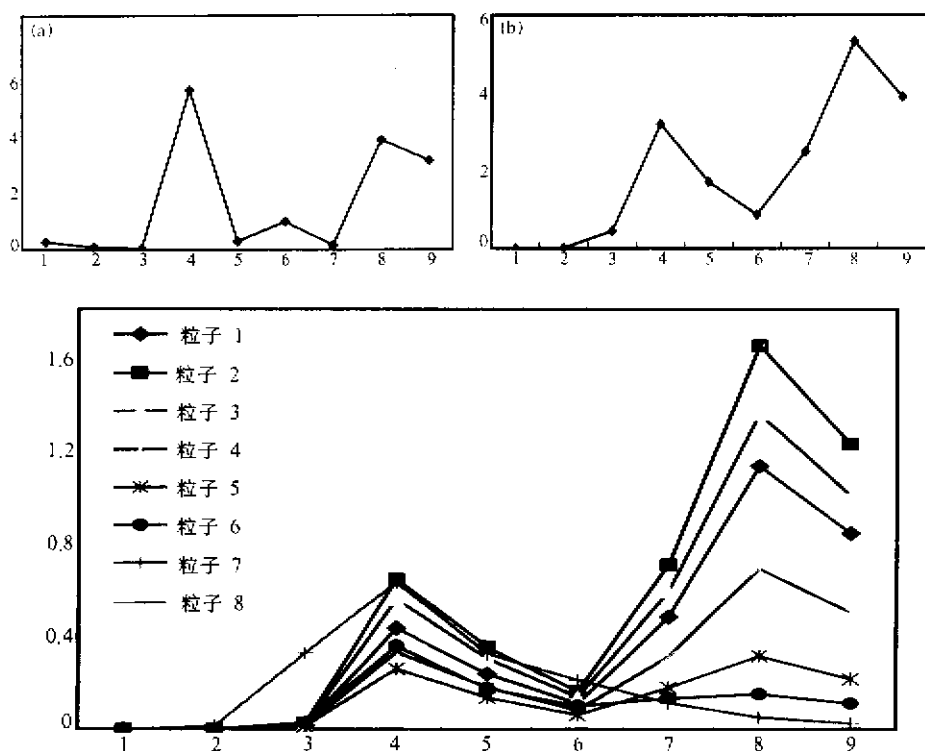


图5 南宁地面放射性沉降量随时间变化

(a) 实测值(相对值); (b) 模拟值; (c) 不同粒径沉降量随时间变化模拟

地面沉降量用(9)式计算。图5、图6是南宁和青岛的地面沉降量实测值、计算值和不同粒径沉降量随时间变化模拟值。其中, 实测值包括了放射性本底值, 而计算值

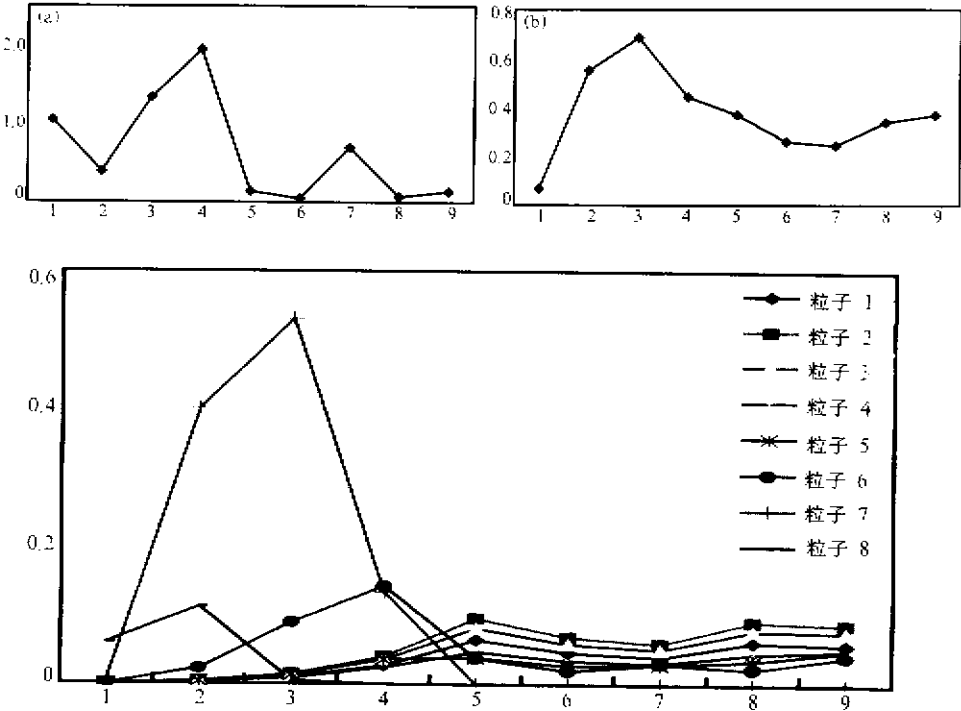


图 6 青岛地面放射性沉降量随时间变化
(a) 实测值 (相对值); (b) 模拟值; (c) 不同粒径沉降量随时间变化模拟

没有包括本底。由于沉降量峰值相对于本底值大很多, 因此可以忽略本底值。可以看出计算值和模拟值非常相近, 其中在南宁的例子中, 模拟出了第 4 天和第 8 天的两个沉降量峰值。而两个城市的沉降量的粒子谱却有所不同, 在南宁小粒子占主要的, 而在青岛大粒子是主要的。这是由于青岛沉降开始得比较早, 南宁沉降开始得较晚, 但第一个峰值的大粒子是主要的。因此可以说在爆后 2~3 天的放射性沉降中, 大粒子的沉降是主要的, 影响沉降的主要因素是重力沉降; 在以后的沉降中, 小粒子是主要的, 影响沉降的主要因素是垂直湍流扩散过程。

图 7 是该次大气层核试验在中国大陆上的地面放射性沉降的 5 天累计沉降量, 利用核试验期间中国 46 个地面观测站实测的地面沉积通量数据, 采用平方反比权重内插到 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 网格上, 由于实测的站点有限, 部分等值线不闭合。图 8 是模式计算结果。需要指出的是实测数据包含了天然放射性本底, 但本底数据相对较小。从图 7、图 8 对比可以看出: 本模式基本模拟出了核爆炸试验放射性沉降的趋势, 如试验场附近的高值区和南方的高值区; 对比图 2 可以看出, 有一股向西南的气流造成了南方的高值区。在 14 km 高空烟云经过的路径上反而没有多少沉降, 这是其下层风切变的结果。地面放射性沉降量的时空分布反映了各个层次高空流场的特性, 这和一般的地面源输送有很大差别。

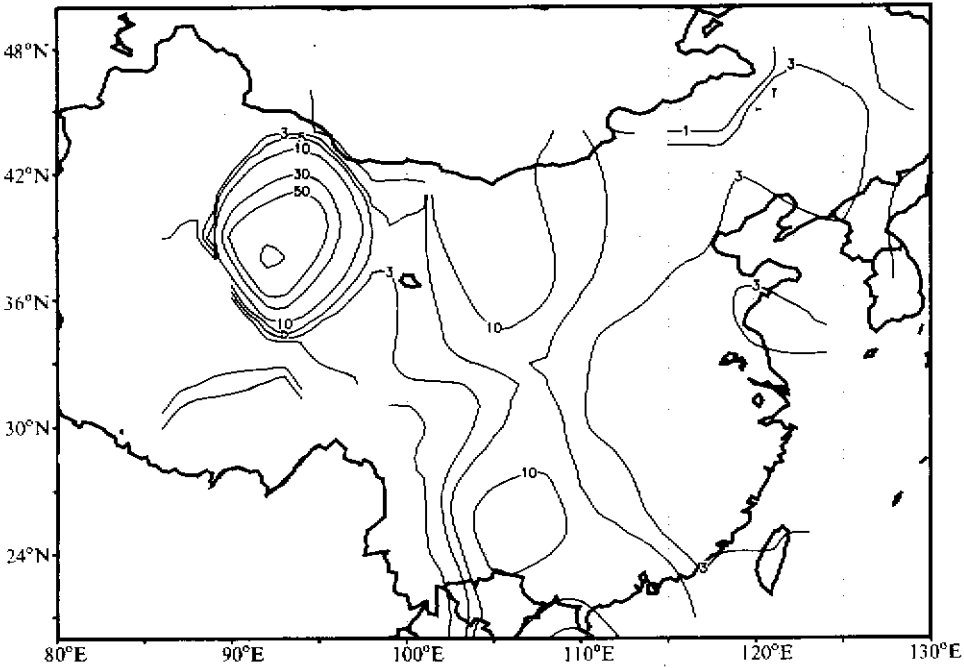


图 7 该次核试验期间地面放射性沉降的 5 天累计量的实测数据 (相对值)

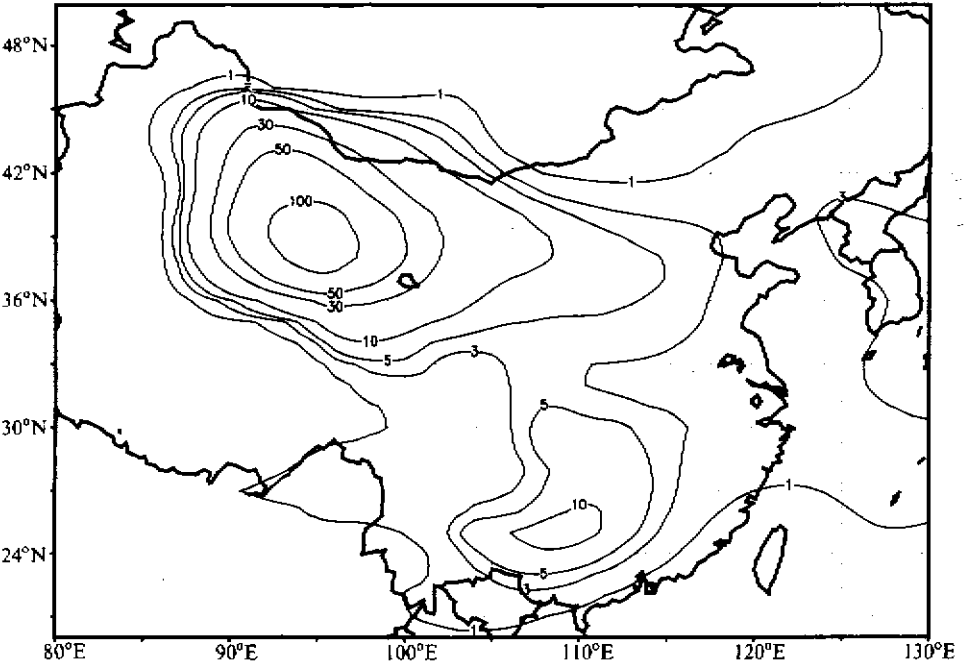


图 8 该次核试验期间地面放射性沉降的 5 天累计量的模拟数据 (相对值)

5 结论

利用三维 Euler 模式模拟大气层核试验放射性碎片的大气输送和扩散, 得到了一些有益的结果: (1) Euler 模式可用于对流层、平流层核烟云长距离输送与扩散研究; (2) 源项强度及空间分布, 尤其是垂直分布将大大影响模拟的准确性; (3) 在早期的放射性沉降中, 大粒子的沉降是主要的, 影响沉降的主要因素是重力沉降; 在以后的沉降中, 小粒子是主要的, 影响沉降的主要因素是垂直湍流扩散过程; (4) 由于核爆炸放射性源在高空, 对流层平流作用较大, 大气边界层的影响相对较弱。本文对于对流层及平流层的输送扩散过程考虑的很粗略, 如: 没有考虑对流层和平流层、对流层和边界层的物质交换及相互作用, 边界层的扩散过程几乎没有考虑, 干湿沉积的模式化也是比较简单的, 这都有待于进一步的工作。

参 考 文 献

- 1 Glasston, S. Dolan, P., *The Effects of Nuclear Weapons*, U.S. Department of Defense and U.S. Energy Research and Development Administration, 1977.
- 2 Willis, J. C., *The History of Fallout Prediction*, United States Air Force, Air Force Institute of Technology, AD-A079560, 1979.
- 3 Zannetti, P., *Air Pollution Modeling—Theories, Computational Methods and Available Software*, 1990, 73~91.
- 4 Pielke, R. A., Regional and Mesoscale Meteorological Modeling as Applied to Air Quality Studies, *Air Pollution Modeling and Its Application VIII*, Edited by H. van Dop and D.G. Steyn, Plenum Press, New York, 1991.
- 5 Knox, J. B. and J.J. Walton, 1978, Modelling Regional to Global Air Pollution, Research and Development Related to Sulphates in the Atmosphere.
- 6 Pack, D. H. et al., Meteorology of long-range transport, *Atmos. Environ.*, 1978, **12**, 425~444.
- 7 Eliassen, A., 1980, A review of long-range transport modeling, *J. of Appl. Meteor.*, **19**, 1231~1240.
- 8 Fisher, B. E. A., A review of the processes and models of long-range transport of air pollutants, *Atmos. Environ.*, 1993, **17**, 1865~1880.
- 9 Pielke, R. A. et al., Regional and mesoscale meteorological modeling as applied to air quality studies, *Air Pollution Modeling and Its Application VIII*, Edited by H. Van Dop and D.G. Steyn, Plenum Press, New York., 1991, 259~289.
- 10 Heffter, J. L. et al., Long-range (CAPTEX) and complex terrain (ASCOT) perfluorocarbon tracer studies, *Regional and Long-Range Transport of Air Pollution*, S. Sandroni (Ed.), 1986, 437~465.
- 11 Draxler, R. R., Overview and preliminary results from the across North America tracer experiment (ANATEX), Sixth Joint Conf. on Appl. of Air Pollution Meteor., 1989, 82~85.
- 12 Lars-Erik De Geer, Chinese Atmospheric Nuclear Explosion from a Swedish Horizon, Scope-Radtest Workshop in Beijing, China 19~21 Oct, 1996.
- 13 乔登江, 核爆炸物理概论, 北京: 原子能出版社, 1988.
- 14 Gifford, F. A., Horizontal diffusion in the atmosphere: a lagrangian-dynamical theory, *Atmos. Envir.*, 1982, **16**, 505~512.
- 15 Nathans M. W. et al., Particle size distribution in clouds from nuclear air burst, *J. Geophys. Res.*, 1970, **75**, 7559~7572.
- 16 Bridgman C. J. and Bigelow W. S., A New Fallout Prediction Model, *Health Physics*, 1982, **43**, 205~218.
- 17 Beard K. V., Terminal velocity and shape of cloud and precipitation drops aloft, *J. Atmos. Sci.*, 1976, **33**, 851~864.
- 18 Wang Zifa, Huang Meiyuan et al., Sulfur distribution and transport studies in East Asia using Eulerian model,

- Advances in Atmospheric Sciences*, 1996, **13**(3), 399~409.
- 19 彭红、秦瑜, 气溶胶湿清除过程的参数化, 大气科学, 1992, **16**, 622~631.
- 20 Zheng Yi, Study on horizontal diffusion in troposphere and low stratosphere, *Advances in Atmospheric Sciences*, 2000, **17**(1), 93~102.
- 21 Barr S., Gifford F. A., The random force theory applied to regional scale tropospheric diffusion, *Atmos. Environ.*, 1987, **21**, 1737~1741.
- 22 雷孝恩, Chang J. S., 一个高分辨对流层物质交换模式, 气象学报, 1993, **51**, 75~86.
- 23 Anthes, R. A. et al., Description of the Penn State/NCAR mesoscale model version 4 (MM4), NCAR/TN-282+STR, NCAR Technical Note, May 1987, 1~66.
- 24 <http://www.scd.ucar.edu/dss/pub/reanalysis/index.html>

A 3-Dimension Euler Model for Long-Range Transportation of Atmospheric Nuclear Explosion Test Radioactive Debris

Zheng Yi, Wang Zifa and Huang Meiyuan

(State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract A three-dimensional long-range Eulerian transport and diffusion model for nuclear test debris clouds in the atmosphere was developed. The source was pretreated by a puff model to fit with $1^\circ \times 1^\circ$ horizontal grid cells. Dry deposition, vertical diffusion, washout and radioactive decay were considered. The model was validated by comparison with a nuclear test fallout data of China. Modelling results are in good agreement with measurement.

Key words: transportation; diffusion; Euler model; radioactivity